625.3
M29c
cop. 2
U. OF ILL. LIBRARY

CHEMINS DE FER DE MONTAGNES

TRACTION

SUR CRÉMAILLÈRE OU PAR ADHÉRENCE

ÉTUDE COMPARATIVE

PAR

M. A. MALLET

Notre collègue, M. Lévy-Lambert, a publié, dans le Bulletin de mars 1906, une intéressante étude sur les Chemins de fer à crémaillère, étude où il traite, avec les développements qu'elle comporte, l'importante question des chemins de fer mixtes formés de sections à adhérence et de sections à crémaillère, sur lesquelles la traction se fait sans interruption au moyen de locomotives disposées spécialement à cet effet. En traitant ce sujet, l'auteur s'est trouvé naturellement amené à signaler le point du choix à faire dans ce cas, le seul, dit-il avec raison, où il puisse y avoir hésitation, entre la crémaillère partielle et l'adhérence sur tout le parcours. Sans entrer plus avant dans l'examen de la question, il se borne à conclure qu'on ne peut rien dire de général à cet égard et qu'une étude détaillée et comparative s'impose dans chaque cas. Il cite à titre d'exemple le cas du chemin de fer de Viège à Zermatt, où les deux solutions ont été examinées et où le choix s'est porté sur le système mixte.

Tout en partageant en principe l'opinion de M. Lévy-Lambert sur l'impossibilité d'émettre des règles générales sur ce sujet, il nous a semblé qu'il y avait quelque chose à dire de plus et qu'il était intéressant de fournir, à propos du choix à faire d'un système, des renseignements basés sur une expérience prolongée. C'est le but de la présente note.

Le problème de l'établissement d'un chemin de fer se pose à deux points de vue : la construction et l'exploitation.

Nous passerons très rapidement sur la première.

54103

Dans la question des chemins de fer en pays de montagnes, il s'agit de relier deux points situés à des altitudes différentes, que le point supérieur soit le terminus de la ligne, ce qui est le cas le plus simple, ou soit l'entrée du tunnel qui franchit le col d'une chaîne séparant deux vallées. Si la pente naturelle moyenne du terrain est supérieure à la déclivité maxima admise pour le chemin de fer, ce qui arrive le plus souvent, on est conduit à allonger le tracé par des lacets ou par des développements dans des vallées secondaires ou, au besoin, on a recours à des artifices tels que des tunnels en hélice pratiqués dans les flancs de la vallée, comme au Gothard et ailleurs. Si la nature de la ligne à établir permet l'introduction de déclivités se rapprochant sensiblement de la pente du thalweg de la vallée à parcourir, on peut suivre le terrain au moyen d'une inclinaison continue assez forte ou introduire une combinaison de fortes et de faibles pentes, de même qu'on rachète la déclivité excessive d'un cours d'eau navigable par l'établissement de biefs éclusés, les fortes pentes du chemin de fer pouvant dans ce cas être franchies au moyen de l'adhérence artificielle sous forme de crémaillère. On conçoit que dans le choix à faire de ces deux systèmes la disposition du terrain joue le plus grand rôle, parce qu'il est nécessaire de suivre autant que possible la surface du sol, afin d'éviter des mouvements importants de terre pour l'établissement de la plate-forme, c'est pour cela qu'une étude est nécessaire pour chaque cas et qu'aucune règle générale ne saurait être formulée en ce qui concerne la construction.

L'exploitation est une autre question. Le problème à résoudre se pose sous cette forme : Une étude sérieuse ayant indiqué que les frais d'établissement d'une ligne dans les deux systèmes, mixte et à adhérence, sont les mêmes ou peu différents, les dépenses comparatives d'exploitation feront-elles pencher la balance en faveur de l'un ou l'autre des deux modes de traction?

Pour fixer les idées, nous allons revenir avec quelques détails sur le sujet du chemin de fer de Viège-Zermatt, simplement mentionné page 559 du mémoire de M. Lévy-Lambert.

Notre regretté collègue J. Meyer, alors Ingénieur en chef de la la construction du chemin de fer Suisse-Occidentale-Simplon, a précisé les conditions dans lesquelles a été adopté l'emploi de la crémaillère pour la ligne Viège-Zermatt dans un très intéressant article paru dans la *Revue Générale des Chemins de fer* d'août 1890.

Il expose que, sur les levés topographiques exécutés dans la

vallée de la Viège, on a en premier lieu étudié un tracé à adhérence continue avec un maximum de rampes de 45 0/00 et un minimum de rayon de courbure de 60 m. Il s'agissait d'une voie de 1 m. Ce tracé avait une longueur de 35 885 m, dont 8 768, soit 18,8 0/0 en palier et 29 116 où 81,2 0/0 en rampes, réparties comme suit pour les plus fortes :

3	de 15	2 000 m	6	de 30	2 464 m
1	18	200	1	37	628
2	20	1 050	1	40	393
3	25	1 270	10	45	16 088

On voit qu'il y avait 4 825 m en déclivités inférieures à 15 0/00. Sur ce tracé, 65 0/0 étaient en alignement droit et 35 0/0 en courbes dont le rayon minimum descendait à 60 m, comme il a été indiqué déjà. Ce projet était estimé à 5 800 000 f.

On avait, en outre, étudié divers tracés avec emploi de la crémaillère pour rampes allant jusqu'à 100 0/00 et dont le plus avantageux donnait une économie finale de 250 000 f sur le tracé à adhérence.

Vers la fin de 1888, MM. Chappuis et de Stockalper présentèrent une modification, consistant à faire un usage plus étendu de la crémaillère, dont ils portaient la déclivité jusqu'à 120 0/00 ; l'économie sur le tracé à adhérence devait aller ainsi jusqu'à 500 000 f. Ce projet fut adopté avec un maximum de déclivité allant jusqu'à 125 0/00.

Une commission dans laquelle figuraient MM. Rodieux, Ingénieur en chef de la traction du chemin de fer de la Suisse-Occidentale et du Simplon, et Haueter, Ingénieur de la traction du chemin de fer Nord-Est-Suisse, fut chargée d'examiner divers chemins de fer à traction mixte en Allemagne et en Suisse. Elle estima que l'augmentation des dépenses de traction par rapport à l'exploitation par adhérence ne dépasserait pas 0,20 f par kilomètre-train, soit un total de 7 000 f par an pour 35 000 km ; il faudrait y ajouter 200 f par an et par kilomètre de crémaillère, pour l'entretien et le graissage de celle-ci, soit pour 6,8 km 1 360 f soit, en tout, 8 360 f d'augmentation dans les frais annuels d'exploitation, en regard d'une économie de 500 000 f sur le capital d'établissement.

La ligne de Viège-Zermatt a été construite sur ces données ; la longueur de la crémaillère a été portée à 7 450 m pour des raisons qu'on trouvera exposées dans le mémoire de Meyer. Le

rayon minimum de courbure est de 80 m, les déclivités sont au plus de 25 0/00 sur les parties à adhérence et de 125 0/00 en crémaillère, cette dernière déclivité n'existe que sur 575,60 m. La ligne a été ouverte à l'exploitation en 1891 et a toujours fonctionné depuis avec un succès technique et financier complet. On sait que la crémaillère est du système Abt et les locomotives ont été établies sur les dispositions étudiées par notre distingué collègue.

Nous ignorons si les chiffres que la commission avait indiqué pour les frais de traction étaient basés sur la comparaison avec les chiffres correspondants obtenus sur des lignes à adhérence à déclivités considérables ou avec les résultats généraux de l'exploitation des chemins de fer. Il existait déjà à cette époque, en dehors de lignes provisoires ou industrielles, quelques chemins de fer établis avec des rampes de 45 0/00 et plus et fonctionnant d'une manière parfaitement régulière. Nous citerons en tête le chemin de fer d'Enghien à Montmorency, dû à l'initiative de notre regretté collègue Émile Level, puis ceux de l'Utliberg, de Waedensweil à Einsiedeln et du Rigi-Scheidegg, en Suisse, pour ne parler que des plus connus, tous exploités toute l'année, à l'exception du dernier, dont l'altitude très forte ne s'y prête pas plus que son genre de trafic.

Nous donnons, dans le tableau ci-dessous, les éléments du tracé de ces quatre lignes.

Tableau I.

Lignes	ENGHIEN-MONTMORENCY	UTLIBERG	WAEDENSWEIL-EINSIEDEN	RIGI-SCHEIDEGG
Année d'ouverture . . .	1869	1879	1877	1874-75
Altitude inférieure . . .	47,24	417,03	411,27	1 441
— supérieure . . .	113,84	816,03	884,20	1 607
Différence de niveau . .	66,60	399	472,93	166
Longueur du tracé . . .	3 020	9 130	16 629	6 619
Déclivité moyenne . . .	22 0/00	43,7 0/00	28,5	25,1
— maxima	46,3	70	50	50
Proportion supérieure à 30 0/00	35,6 0/0	67,7 0/0	»	45 0/0
Rayon minimum des courbes	250	135	150	105
Écartement	normal	normal	normal	1 m

Il est très possible que, malgré l'existence des lignes dont nous venons de parler, il y eut encore en 1888 une certaine prévention contre l'emploi des fortes rampes, tout au moins au point de vue du coût de leur exploitation, et que l'établissement d'une ligne avec une notable proportion de déclivités de 45 0/00 fut considéré comme présentant des aléas qu'on ne risquait pas de rencontrer avec la crémaillère, déjà largement expérimentée alors.

A défaut de cette application, l'adhérence en trouva d'autres. La ligne de Landquart-Davos fut construite très peu après (1890) avec des rampes de 45,2.

La déclivité moyenne est de 25,4 0/00 sur 44 km, de 37,1 sur 22 km et de 40,4 sur 8 180 m; sur cette dernière partie on trouve une rampe de 4 087 m en déclivité de 40 à 45 0/00, avec de nombreuses courbes de 110 et 100 m de rayon.

Cette ligne, qui s'élève à l'altitude de 1 633 m, est exploitée toute l'année.

En 1893 fut établie une autre ligne, également à voie de 1 m, qui présente des conditions de tracé des plus intéressantes et qui, c'est un détail que nous ne saurions passer sous silence, a été étudiée par M. Chappuis, un des auteurs du tracé mixte du Viège-Zermatt. Nous voulons parler du chemin de fer d'Yverdon-Sainte-Croix, que nous prendrons comme terme de comparaison dans cette étude avec la ligne de Viège-Zermatt, avec laquelle il présente une assez grande analogie tout en s'en différenciant beaucoup sous certains rapports, que nous aurons soin d'indiquer.

Nous donnons dans le tableau ci-après les caractéristiques essentielles de ces deux lignes que, pour abréger, nous désignerons sous les initiales V.-Z. et Y.-S.-C.

La ligne d'Yverdon à Sainte-Croix présente une première section d'Yverdon à Baulmes de 11 501 m de longueur, dont la déclivité moyenne est de 17,1 0/00 seulement, la seconde section de Baulmes à Sainte-Croix, de 12 668 m de longneur, a une rampe moyenne de 34,5, qui se décompose comme suit : de Baulmes à Six-Fontaines, longueur 2 900 m, déclivité moyenne 25,5 ; de Six-Fontaines à Trois-Villes, 4 865 m et 41,5 ; de Trois-Villes à Sainte-Croix, 4 901 m et 32,5 0/00. On trouve entre Six-Fontaines et Trois-Villes une rampe continue de 3 766 m en 43,2-43,6 et 44 0/00, et entre Trois-Villes et Sainte-Croix une de 3 770 m en déclivité de 43,2 et 44,0. Avec ces rampes se ren-

contrent un grand nombre de courbes de 120 à 100 m de rayon. Il y a 61 0/0 du tracé en alignement droit et 39 en courbes, dont 20,6 0/0 de rayon inférieur à 200 m.

Tableau II.

	VIÈGE-ZERMATT	YVERDON-SAINTE-CROIX
Écartement de voie	1 m	1 m
Longueur exploitée	35 050 m	24 167 m
Altitude du terminus inférieur	653,50 m	437,80 m
— — supérieur	1 608,50 m	1 069,20 m
Différence de niveau	955 m	631,40 m
Déclivité moyenne	27,2 0/00	26,1 0/00
— maxima	125	44
Proportion des rampes de plus de 30 0/00.	18 0/0	47,2 0/0
Rayon minimum des courbes	80 m	100 m
Poids des rails par mètre courant	24,2 kg	24,2 kg
Nombre moyen de voyageurs par an	59 916 (1)	63 120 (1)
Tonnage moyen des marchandises	5 520 t	28 840 t
Coût total d'établissement	5 350 000 f	3 032 000 f
— par kilomètre	153 000	130 000 f
Durée d'exploitation	été seulement	toute l'année, les dimanches exceptés

(1) On a pris, pour le nombre de voyageurs et le tonnage des marchandises (bagages compris) les moyennes des chiffres correspondants aux années 1900, 1901, 1902 et 1903.

Il semble que ces deux lignes, situées dans le même pays à moins de 200 km l'une de l'autre, fonctionnant régulièrement depuis treize et quinze ans, et présentant une assez grande analogie comme profil et comme genre de trafic, offrent un intéressant champ de comparaison au point de vue de l'exploitation et peuvent fournir des renseignements très précieux pour le sujet dont nous nous occupons.

Nous nous proposons donc de faire une étude des dépenses de traction de ces deux lignes, et de rechercher quel serait sur ces dépenses l'effet de l'application, au Viège Zermatt, de la traction par adhérence sur le tracé étudié en 1888.

Nous nous baserons pour ces recherches sur les résultats contenus dans les *Statistiques des Chemins de fer suisses*, publiées tous les ans par le Département fédéral des Postes et des Che-

mins de fer. Ces statistiques sont très détaillées, on peut avoir toute confiance dans leur exactitude et, comme les résultats sont donnés sous la même forme pour toutes les lignes, on a toute garantie au sujet de la légitimité des comparaisons. Nous avons pris les années 1900, 1901, 1902 et 1903, et nous nous servirons des moyennes des chiffres de ces quatre années.

Avant d'aller plus avant, nous devons faire observer que, si les deux lignes dont nous nous occupons offrent une certaine analogie qui justifie leur mise en comparaison, elles présentent par ailleurs des différences importantes dont il est indispensable de tenir compte. Nous ne parlons pas de la dissimilitude du mode de traction, dissimilitude qui justifie précisément la comparaison que nous faisons. La plus importante différence est dans la durée de l'exploitation ; celle-ci a lieu, au Viège-Zermatt, dans les mois d'été, soit pendant cent vingt à cent quarante jours suivant la saison. A l'Yverdon-Sainte-Croix, elle a lieu toute l'année, sauf les dimanches où il n'y a aucun service.

Cette particularité, unique, croyons-nous, tout au moins en Europe, est la conséquence d'une clause introduite dans la concession à la requête du demandeur.

Les conséquences de la différence des durées d'exploitation sont diverses et de sens opposés. La concentration d'un trafic donné de voyageurs sur un petit nombre de jours conduit à un service intensif qui peut être un peu plus coûteux, mais le matériel est mieux utilisé, comme le montre le coefficient d'utilisation des places que nous verrons plus loin. L'entretien du matériel et de la voie est plus facile à faire pendant des interruptions totales de service de huit ou neuf mois que pendant le service courant. La question du personnel joue également son rôle. Mais le point le plus important est la cause d'infériorité qu'amène, pour l'Yverdon-Sainte-Croix, le service en hiver dans une région où la température s'abaisse à — 20 degrés, et où la neige est très abondante. Si on ajoute le chauffage des trains par la vapeur de la locomotive, on trouvera des raisons sérieuses d'augmentation de la dépense de combustible. Cette augmentation, si elle est réelle, n'est pas facile à chiffrer. Nous croyons devoir en tenir compte par voie de compensation. Le tracé à adhérence du V.-Z. comportait des courbes de 60 m de rayon, tandis qu'à l'Y.-S.-C., il n'y a pas de courbes de moins de 100 m de rayon. La présence de courbes de 60 m n'entraînerait, du reste, aucune difficulté pour l'exploitation avec les wagons à bogies

du V.-Z. Quant aux locomotives de l'Y.-S.-C., leur construction articulée leur permet de circuler facilement dans les courbes dont il s'agit, et même dans des courbes de rayon inférieur, puisque des machines du même modèle ont passé couramment dans les courbes de 40 m de rayon du réseau des tramways de la Côte-d'Or. Il y a certainement à tenir compte d'un léger excès de résistance à la traction et d'usure des boudins des roues à cause de ces courbes. Mais c'est peu de choses et si, faute d'éléments d'appréciation, nous compensons ce chapitre par celui de l'accroissement des dépenses de traction par suite de l'exploitation en hiver, nous croyons que c'est tout à l'avantage de la crémaillère et nous faisons toutes nos réserves à ce sujet.

Il est utile de dire ici quelques mots des locomotives employées sur les deux lignes. Nous donnons dans le tableau III leurs dimensions principales.

Tableau III.

	W.-Z.	Y.-S.-C.
Constructeurs	Winterthur	Grafenstaden
Surface de grille	1,2	1,02
— de chauffe	65,5	74
Pression à la chaudière	12	12
Cylindres à adhérence	320 × 450	(280-425) × 500
— à crémaillère	360 × 450	»
Diamètre des roues motrices	0,900	1,010
— des pignons dentés	0,688	»
Écartement des essieux parallèles	1,96	1,40
— total	4,30	4,67
Poids de la machine vide	23 500	26 800
Eau dans les caisses	2 500	3 500
Charbon dans les soutes	1 300	1 000
Poids maximum en service	29 000	34 300
— — adhérent	20 600	34 300
— moyen	27 900	31 900

Les machines du Viège-Zermatt sont à deux mécanismes entièrement indépendants. Elles sont portées sur trois essieux dont deux sont accouplés ensemble et commandés par deux cylindres extérieurs ; le troisième essieu, placé à l'arrière, est à déplacement radial. Deux cylindres intérieurs actionnent les deux pignons

dentés engrenant avec la crémaillère. Ces machines ont un frein à main agissant sur les roues, un frein à bande serrant des disques solidaires des pignons dentés, un frein à compression d'air par les cylindres des deux mécanismes et un frein à vide Smith-Hardy agissant sur la locomotive et le train.

Les locomotives de l'Yverdon-Sainte-Croix appartiennent au type compound articulé Mallet; elles sont à adhérence totale et portées sur quatre essieux.

Elles sont munies d'un frein à main agissant sur les roues, d'un frein à compression d'air par les cylindres et du frein à vide Smith-Hardy, pour le train et la machine.

Le tableau IV donne les chiffres relatifs au trafic, au poids moyen des trains et à l'utilisation des places.

Tableau IV.

Années.	1900	1901	1902	1903	MOYENNE
Viège-Zermatt.					
Parcours des trains	43 412	44 256	45 782	42 503	43 990
Nombre de voyageurs transportés	51 661	57 764	62 212	68 029	59 916
Tonnage des marchandises. .	4 571	5 374	6 043	6 091	5 520
Poids moyen du train total. .	58,0	59,4	59,0	58,2	58,7
— — remorqué	30,0	31,5	31,1	30,3	30,7
Charge utile	6,9	6,4	6,7	6,7	6,7
Utilisation moyenne des places	33,7 0/0	39,4 0/0	68,5 0/0	73,2 0/0	53,5 0/0
Yverdon-Sainte-Croix.					
Parcours des trains	57 836	52 972	53 867	53 891	54 640
Nombre de voyageurs transportés	64 514	61 321	61 895	64 750	63 120
Tonnage des marchandises. .	25 051	22 249	31 366	36 717	28 240
Poids moyen du train total. .	62,8	62,1	65,3	69,2	64,8
— — remorqué	30,9	30,2	33,4	37,3	32,9
Charge utile	7,6	7,5	8,8	10,6	8,6
Utilisation moyenne des places	27,2 0/0	36,4 0/0	30,4 0/0	28,7 0/0	30,6 0/0

On voit, par ce tableau, que le train moyen de l'Y.-S.-C. pèse 64,8 t, soit 6,1 t de plus que le train moyen du V.-Z. Si donc on fait, sur le tracé à adhérence du V.-Z., circuler le train de celui-ci attelé de la machine de l'Y.-S.-C. pesant 31,9 t, on aura un

train de 62,6 t, soit 2,2 t de moins que le train moyen de l'Y.-S.-C.

Le tableau V donne les dépenses de traction par kilomètre de train des deux lignes avec leur décomposition en leurs divers éléments.

TABLEAU V.

Années.	1900	1901	1902	1903	MOYENNE
Viège-Zermatt.					
Parcours annuel.	43 412	44 256	45 728	46 970	45 105
Personnel.	0,42	0,42	0,41	0,42	0,42
Matières.	0,56	0,75	0,61	0,62	0,62
Entretien et réparations . .	0,46	0,42	0,61	0,63	0,53
Divers	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Dépenses totales par train-kil.	1,45	1,60	1,65	1,68	1,58
Yverdon-Sainte-Croix.					
Parcours annuel.	57 386	52 972	53 867	53 891	54 529
Personnel.	0,15	0,16	0,16	0,14	0,15
Matières.	0,50	0,52	0,49	0,43	0,48
Entretien et réparations. . .	0,27	0,26	0,23	0,26	0,26
Divers	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03
Dépenses totales par train-kil.	0,95	0,96	0,90	0,86	0,92

On voit, à l'inspection de ce tableau, que les dépenses de traction sur la ligne à adhérence de l'Y.-S.-C. sont beaucoup plus faibles, presque 50 0/0, que celles de la ligne mixte du V.-Z.; mais nous devons, comme nous l'avons indiqué, introduire quelques corrections pour que la comparaison soit aussi légitime que possible (1).

Si nous entrons dans la décomposition des dépenses de traction telle qu'elle ressort du tableau V, nous trouvons une énorme différence sur le chapitre du personnel, 0,42 et 0,15 f. Cette différence tient, au moins en grande partie, au mode d'exploitation du V.-Z., qui concentre la totalité du trafic dans une courte période et exige un plus grand nombre de machines. En fait,

(1) La dépense de traction de 0,92 par train-kilomètre de l'Y.-S. C. concorde très bien avec celle de 1 f pour un train de 64 t du Landquart-Davos à l'époque où cette ligne était seule. Aujourd'hui qu'elle est englobée dans le réseau des Chemins de fer Rhétiques avec des lignes à profil moins accidenté, la comparaison ne présente plus le même intérêt. On trouve, pour ce réseau en 1903, une dépense par train-kilomètre de 0,89 f pour un train moyen de 79 t.

l'Y.-S.-C. n'en a que trois contre six pour le V.-Z. et ce pour un parcours kilométrique supérieur, mais reporté sur toute l'année.

Nous devons supposer qu'une partie du personnel de la seconde ligne est conservé pendant la suspension du service pour des travaux concernant le matériel, mais sans relation directe avec la traction, et, comme nous manquons d'éléments d'appréciation à cet égard, nous croyons devoir trancher la question en prenant purement et simplement le chiffre de 0,42 du V.-Z.

Dans ces conditions, les dépenses de traction pour le train-kilomètre s'établiront comme suit :

Personnel	0,42	1,19 f
Matières	0,48	
Entretien et réparations . .	0,26	
Divers	0,03	

Nous avons supposé que le prix du combustible était le même pour les deux lignes. Si on admet qu'elles brûlent du charbon de la Loire, arrivant par Lausanne, Viège est à 100 km plus loin de cette ville qu'Yverdon, ce qui est insignifiant et, d'autre part, les Chemins de fer Fédéraux qui exploitent la ligne de V.-Z. et ont un réseau de plus de 2 500 km, payent bien probablement leur charbon meilleur marché qu'une petite ligne qui n'a que 25 kilomètres.

Nous n'avons plus qu'à déterminer la longueur à appliquer aux dépenses kilométriques. La note de J. Meyer indiquait pour le tracé à adhérence du V.-Z. une longueur de 35 885 m, mais cette note supposait l'emploi de rampes de 45 0/00 sur 16 087 m. Comme l'Y.-S.-C. n'a que des rampes de 44, il faudra allonger cette partie dans le rapport de 45 à 44, ce qui le porte à 16 452 m soit une augmentation de 365 m laquelle porte ainsi la longueur totale du tracé à 36 250 m. Le prix de traction par adhérence, pour être comparé au prix de traction par crémaillère, devra donc être augmenté dans le même rapport que les parcours, c'est-à-dire $\frac{36\,250}{35\,050} = 1{,}034$ ce qui donne $1{,}19 \times 1{,}034 = 1{,}23$. On se rappelle que les experts de 1888 indiquaient dans leur rapport que la traction par le système mixte ne coûterait par train-km que 0,20 f de plus qu'avec l'adhérence. Nous trouvons ici 1,58 — 1,23 = 0,35 f environ. La différence serait presque double du chiffre prévu.

A égalité du nombre de trains, le parcours annuel avec l'adhé-

rence devra être augmenté dans le rapport des longueurs des tracés, soit de 1 à 1,034, il deviendra donc 45 105 × 1,034 = 46 639.

Nous pourrons donc établir comme suit les dépenses de traction comparatives pour l'année ou plutôt la saison.

V.-Z. actuel	45 105 km à 1,58 f =	71 266 f
V.-Z. à adhérence	46 639 km à 1,19 f =	55 500 f
	DIFFÉRENCE	14 766 f

Cette économie de près de 15 000 f n'est évidemment pas très élevée en présence d'une dépense totale d'exploitation d'environ 220 000 f par an, mais nous croyons que ce chiffre est un minimum qui serait dépassé notablement en réalité; nous rappelons à ce sujet les réserves que nous avons faites à l'occasion de l'exploitation d'hiver de l'Y.-S.-C. et des frais supplémentaires qu'elle entraîne.

Nous avons encore à examiner la question de l'entretien et surveillance de la voie.

Nous prendrons dans les statistiques officielles les chiffres relatifs à ce chapitre pour les mêmes années 1900, 1901, 1902 et 1903 et nous nous baserons sur les moyennes de ces chiffres. Le tableau VI donne pour les deux lignes les dépenses d'entretien et surveillance de la voie totale et par kilomètre de ligne.

TABLEAU VI.

Années.		1900	1901	1902	1903	Moyenne
V.-Z.	Dépenses totales . .	43 314	52 052	51 817	55 310	50 873
	Dépenses par kilom	1 231	1 446	1 439	1 576	1 451
Y.-S.-C.	Dépenses totales . .	24 836	20 093	19 817	20 742	21 392
	Dépenses par kilom.	994	804	796	857	884

Si on établissait la comparaison sur ces bases, on trouverait les résultats suivants :

V.-Z. actuel	35 050 × 1 451 =	50 873
V.-Z. à adhérence	36 250 × 884 =	32 045
	DIFFÉRENCE	18 828

Mais ce n'est pas ainsi qu'il faut procéder.

Les dépenses d'entretien et surveillance de la voie ne s'appliquent pas seulement à la voie proprement dite, traverses, rails, crémaillère et ballast; elles comprennent aussi l'entretien des ouvrages d'art. On ne peut donc pas appliquer sans examen les chiffres d'une ligne à une autre. Cependant, dans le cas dont nous nous occupons, les différences dans les conditions de la construction ne sont pas très importantes, on peut en juger par les chiffres suivants. Le V.-Z. a huit tunnels d'une longueur totale de 318 m, il a trente et un ponts métalliques de 357 m il y a 13 km en tranchées et 21 km en remblais, tandis que l'Y.-S.-C. a cinq tunnels de 461 m, il a quatorze ponts métalliques de 64 m, des tranchées sur 12 km et des remblais sur 11. Les rails sont exactement du même poids, la charge par essieu est sensiblement la même et le trafic présente des chiffres peu différents. Il ne semble pas qu'un tonnage donné use plus une voie en circulant quatre mois seulement qu'en employant toute l'année pour le faire. Au contraire, l'exploitation d'hiver donne lieu à des dépenses supplémentaires (1) et l'Y.-S.-C. a certaines parties à flanc de coteau dans un terrain difficile qui exigent des travaux continuels d'entretien.

On sait que les experts de 1888 admettaient le chiffre de 200 f par an de dépenses supplémentaires par kilomètre de crémaillère pour le graissage et l'entretien de cet organe ce qui ferait un total de 1 500 f par an.

Il semble difficile de concilier ce chiffre avec la différence de prix de 19 000 f environ trouvé plus haut. Du reste, nous avons le moyen de serrer la question d'un peu plus près, les statistiques dont nous nous servons contiennent, en effet, la décomposition des dépenses d'entretien et de surveillance de la voie, en sous-détails dénommés : personnel, travaux d'entretien et de renouvellement et dépenses diverses. C'est le second de ces titres qui semble se rapporter à ce que nous cherchons. Nous avons les chiffres suivants par kilomètre de voie :

Tableau VII.

Années. .	1900	1901	1902	1903	Moyenne
V.-Z.	948	1 157	1 137	1 315	1 139
Y.-S.-C. . . .	646	555	605	492	575

(1) L'enlèvement des neiges, par exemple, qui n'est pas une dépense insignifiante.

En appliquant ces chiffres aux longueurs de tracés, nous avons :

V.-Z. actuel	35 050 × 1 139 =	39 921
V.-Z. à adhérence	36 250 × 575 =	20 844
	DIFFÉRENCE	19 077

C'est un chiffre à peu près identique au précédent.

Le fait d'une économie notable dans les dépenses d'entretien de la voie sur une ligne établie comme celle d'Y.-S.-C. paraît donc hors de doute.

Maintenant devons-nous tabler sur cette différence et la porter entière au crédit de l'exploitation par adhérence ? Nous ne croyons pas devoir aller si loin. Nous nous bornerons à admettre que, si l'on ajoute à l'économie de 15 000 f environ par an réalisée sur les frais de traction une faible portion seulement de la réduction des dépenses relatives à la voie et si on tient compte de la modération avec laquelle ont été établis certains chapitres et des omissions volontaires que nous avons faites de certains points (1) il est raisonnable de penser qu'on arrivera ainsi à une économie annuelle en faveur de l'adhérence de 20 à 25 000 f représentant l'intérêt à 4 ou 5 0/0 de la somme de 500 000 f à laquelle les experts avaient estimé l'augmentation du coût de la ligne V.-Z. établie à adhérence (2). Il n'y aurait donc, au point de vue financier, ni avantage ni inconvénient à recourir à l'adhérence si son emploi ne paraissait devoir amener une réduction notable de la durée du parcours. Ces durées et les vitesses commerciales sont données pour les deux lignes V.-Z. et Y.-S.-C. dans le tableau VIII ci-dessous.

(1) Voici quelques chiffres qui peuvent donner une idée de l'importance de l'augmentation de la consommation de combustible due à l'exploitation en hiver dans des conditions analogues à celles de la ligne de Y.-S.-C. Sur un chemin de fer dans le nord de l'Europe employant des machines du même type, les consommations kilométriques en hiver et en été sont dans le rapport de 1 à 0,70, soit une moyenne de 0,85, le rapport de la consommation d'été à la consommation moyenne est donc de 0,82. Ce coefficient appliqué à la consommation kilométrique de 0,38 f de combustible de l'Y.-S.-C. donnerait sur la consommation moyenne une économie de 0,07 f soit pour 46 639 km une économie annuelle de 3 265 f portant ainsi la réduction des frais de traction à 18 031 f par an.

(2) Le coût de la ligne V.-Z. est indiqué à 5 800 000 f dans le mémoire de M. Lévy-Lambert ; c'est le prix auquel avait été estimé le tracé à adhérence. Il est possible qu'en exécution celui-ci n'eut pas coûté sensiblement plus cher que l'autre et, dans ce cas, les économies réalisées dans la traction et l'entretien de la voie constitueraient des bénéfices nets.

Tableau VIII.

	V.-Z.	Y.-S.-C.
Distance	35 km	24,2 km
Durée moyenne du parcours	2 h 14 m	1 h 5 m
Vitesse commerciale	16 km	22,4 km

Comme il y a le même nombre, six, de stations intermédiaires dans les deux cas, il n'y a pas à tenir compte des arrêts.

Si nous appliquons la vitesse de 22,4 km au parcours de 36,25 km du tracé à adhérence du V.-Z., nous trouvons une durée de trajet de 1 h. 38 m. inférieure de 36 minutes ou 27 0/0 à la durée actuelle du parcours. On peut encore gagner 5 minutes et faire le parcours d'Yverdon à Sainte-Croix en 1 heure, comme nous l'avons constaté personnellement, ce qui correspond à la vitesse très admissible de 30 km à l'heure entre les stations.

Cette vitesse réduirait la durée du trajet entre Viège et Zermatt à 1 h. 27 m., soit un gain de 47 minutes ou 34 0/0. Cette réduction, contre laquelle on ne saurait lutter par une augmentation analogue sur la ligne actuelle où la vitesse est limitée par la crémaillère et aussi un peu par la disposition des machines, constitue un avantage pour les voyageurs qui, malgré la beauté de la vue, pendant le trajet, ne seraient pas fâchés d'être moins longtemps serrés dans des wagons bondés pendant le fort de la saison et un autre non moins sérieux au point de vue de l'utilisation de la ligne et du matériel (1), utilisation limitée par la faible durée de l'exploitation. Nous croyons que cette considération relative à la vitesse est de nature à attirer très sérieusement l'attention et elle paraît avoir toujours été laissée de côté jusqu'ici.

Pour compléter la comparaison que nous avons faite entre les deux lignes de Viège-Zermatt et d'Yverdon-Sainte-Croix, comparaison qui a servi de base à notre étude, nous ne saurions nous dispenser de dire quelques mots des résultats financiers donnés par elles. Voici les chiffres pour les quatre années considérées et les moyennes.

(1) Et nous ajouterons du personnel, car, si la vitesse est plus grande, les dépenses de conduite pourront diminuer et il en résultera un certain abaissement de ce chef dans le prix de traction du train-kilomètre, abaissement qui s'ajoutera aux autres causes que nous avons indiquées.

Tableau IX.

Années.	1900	1901	1902	1903	MOYENNE
Viège-Zermatt					
Recette kilométrique	14 339	16 063	17 791	17 441	16 161
Dépense —	5 837	5 661	6 010	6 588	5 882
Différence	9 102	10 402	11 751	10 853	10 279
Coefficient d'exploitation	36,5	35,2	36,0	37,8	36,4
Yverdon-Sainte-Croix.					
Recette kilométrique	6 575	6 284	6 857	7 548	6 816
Dépense —	5 128	4 545	4 505	4 524	4 675
Différence	1 447	1 739	2 352	3 024	2 141
Coefficient d'exploitation	78,0	72,3	65,7	60,0	69,0

Le produit net rapporté au capital d'établissement des lignes se trouve représenté de la manière suivante, au moyen des éléments que nous venons de donner plus haut.

Tableau X.

	V.-Z.	Y.-S.-C.
Recettes totales	577 784	168 844
Dépenses totales	210 251	115 980
Produit net	367 533	52 864
Prix d'établissement	5 350 000	3 030 000
Produit net pour cent	6,9	1,7

On sera frappé de l'énorme différence des résultats financiers donnés par ces deux lignes, placées cependant dans des conditions qui semblent assez analogues. L'infériorité du produit net de la seconde ligne ne tient pas à l'élévation des dépenses qui sont en réalité très modérées, mais à l'insuffisance des recettes, et cette insuffisance, au point de vue de la comparaison, tient, sans parler ici de la suppression totale du service le dimanche, à ce que l'Y.-S.-C. a les tarifs ordinaires, tandis que le V.-Z. jouit de la faveur des tarifs de montagne. A la première ligne, le tarif pour la classe unique de voyageurs est de 0,10 f par kilomètre, tandis qu'à la seconde on paye 16 f en seconde et 10 f en troisième pour 35 km, soit 0,45 f et 0,29 f par kilomètre. L'explica-

tion est, comme on voit, des plus simples et il est certain que, si c'est l'emploi du tracé à crémaillère avec rampes de 125 0/00 qui a amené la concession de tarifs élevés, il n'y avait pas à hésite rentre les deux solutions, et la crémaillère s'imposait, mais on conviendra que ce genre de considérations saurait être regardé comme rentrant dans le domaine technique.

On nous objectera probablement que la question que nous étudions ici n'a plus grand intérêt aujourd'hui en présence de la traction électrique. Il est incontestable, en effet, que l'emploi de voitures automobiles, pour lesquelles l'électricité présente de si précieux avantages, se prête particulièrement à l'exploitation par adhérence des lignes à profil accidenté, et recule très notablement la limite inférieure de l'usage de la crémaillère. Mais la traction électrique n'est pas une panacée universelle; si elle est indiquée pour les tramways, elle ne s'applique pas aussi bien aux chemins de fer où il n'y a pas qu'un service de voyageurs. On sait que sur la ligne Berthoud-Thoune, les trains de voyageurs sont mus par l'électricité et les trains de marchandises par la vapeur. Cette solution ne peut être généralisée. D'autre part, bien des personnes pensent encore que la traction électrique, pour être nettement économique, doit emprunter le courant à des forces hydrauliques dont beaucoup de localités sont absolument privées. Il semble donc que, pour ces diverses raisons, il se construira encore, pendant une période plus ou moins longue, des chemins de fer de montagnes à traction par la vapeur et il n'était pas inutile de présenter les observations précédentes de nature, croyons-nous, à jeter quelque lumière sur cette question.

Nous l'avons étudiée sans aucun parti pris, nous sommes d'ailleurs un partisan de la crémaillère de la première heure. Dès 1872, nous faisions connaître à nos collègues dans un mémoire inséré dans les Bulletins de la Société les applications du Rigi et d'Ostermundingen et, à propos de cette dernière, nous signalions l'avenir que semblait présenter la combinaison de l'adhérence et de la crémaillère pour l'exploitation des chemins de fer en pays de montagne. Il y avait alors peut-être quelque hardiesse à émettre une telle opinion, car les autorités les plus reconnues à l'époque dans ces questions, étaient loin d'être favorables à la crémaillère. « Les Rigi sont rares, disait Couche, et on ne voit guère à quelle autre circonstance pourrait s'appliquer ce système. L'essai d'Ostermundingen avait sans doute en vue,

non une solution applicable à une exploitation permanente, ma seulement de compléter l'étude de ce mode de traction » (1). O. en 1900, soit moins de trente ans après, il y avait en exploitation 90 lignes à crémaillère représentant une longueur collectiv de 1 200 km, réparties dans presque tous les pays du monde.

Cette appréciation de Couche, qu'on peut s'étonner de trouv émise par un esprit aussi judicieux, s'explique par une préoc cupation exagérée du faible rendement de la locomotive en rampe et des inconvénients du poids mort. Cette même idée peut conduire à des applications injustifiées de la crémaillère.

Certes, le rendement de la locomotive à adhérence est faib. sur les déclivités prononcées, mais ce rendement n'est qu'un des éléments du problème. Celui-ci, dans l'exemple qui a servi de base à notre travail, se résume en somme comme suit : Si une locomotive à adhérence de 33 t remonte un train du poids de 31 t à une hauteur de 955 m, au même prix, dans un temps notablement moindre et dans les mêmes conditions de sécurité qu'une locomotive pesant seulement 29 t, mais s'aidant d'une crémaillère, la première solution sera préférable et la question plutôt théorique du rendement disparaît. C'est comme si, dans le domaine de la production de la force motrice, on trouvait un moteur dont le rendement calorifique dépasserait celui de toutes les machines thermiques connues, mais qui ne pourrait fonctionner qu'avec un combustible coûteux; l'avantage resterait en pratique à des moteurs moins parfaits théoriquement.

Nul n'apprécie plus que nous les services rendus à l'industrie des chemins de fer par les promoteurs de la crémaillère et le rôle que celle-ci a joué et est encore appelée à jouer dans l'exploitation des lignes accidentées ; aussi nous associons-nous sans réserve aux appréciations sur ce sujet du mémoire de M. Lévy-Lambert. Mais c'est précisément pour cela que nous nous croyons autorisé à insister sur la nécessité de ne faire de la crémaillère que des applications judicieuses et de réserver ce précieux auxiliaire pour les cas où son emploi est réellement indiqué. Nous serions heureux si ce modeste travail pouvait être de quelque utilité dans le choix d'un système de traction pour lignes de montagnes.

(1) *Voie, matériel roulant et exploitation technique*, etc. T. II, p. 735.